



شناسایی مودال ساختار ماشینهای دوار با استفاده از روش تخمین

حسین پیرزاده^۱، علیرضا محمدیون^{۲*}، آرمن آدامیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*تهران، ایران، ar.mohammadion@gmail.com

چکیده

این مقاله به شناسایی مودال ساختار ماشینهای دوار با استفاده از روش تخمین طی دو آزمایش می‌پردازد. آزمایش (۱) شناسایی یک سیستم کامل بدون نیاز به اندازه‌گیری یک ردیف از ماتریس FRF درحالیکه یک ستون ماتریس مشخص باشد، با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی روتور با چهار درجه آزادی. آزمایش (۲) شناسایی پارامترهای موجود در یک سیستم صنعتی که در آزمایش ۱ نمایان نشده است. سیستم آزمایشی یک سیستم ارتعاشی پیوسته بوده بنابراین شناسایی آن نیازمند استفاده از روشی است که آنرا به مانند یک سیستم گسسته توصیف کند و اغتشاش دراندازه‌گیریها نشان داده شده تا بتوان سیستم پیوسته را با یک مدل کوتاه در محدوده‌ی فرکانسی معین بیان کرد، آنگاه امکان تخمین پارامترهای مودال آن وجود دارد. همچنین نشان داده شد که دقتی که با آن بردارهای ویژه چپ تعیین می‌شوند می‌تواند تحت تاثیر دقتی باشد که با آن ثابت‌های مودال مربوط به همان مودها، از داده‌های اندازه‌گیری شده، تعیین می‌گردند. بنابراین می‌توان این نتیجه را گرفت که بردارهای ویژه چپ خود تحت تاثیر حضور اغتشاش موجود دراندازه‌گیری قرار خواهند گرفت. اثرات وجود اغتشاش برای درجات آزادی با دامنه‌های پاسخ کوچک برای نواحی فرکانسی در مجاورت مودهای نزدیک به هم، برجسته‌تر خواهد بود. همچنین علیرغم وجود ارتعاش، بردارهای ویژه چپ بینی شده برای مشخص کردن یک ردیف از ماتریس FRF با استفاده از اندازه‌گیری یکی از ستون‌های آن مناسب است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۴ فروردین ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۹ خرداد ۱۳۹۷

ارائه در سایت: ۱۵ مرداد ۱۳۹۷

کلیدواژگان

روش تخمین

ماشینهای دوار

مودال

Identifying the modal behaviour of rotary equipment via estimation method

Hossein Pirzadeh¹, Alireza Mohammadion^{2*}, Armen Adamian³

1- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran

3-Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran

*Tehran, Iran, ar.mohammadion@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Received 13 April 2018

Accepted 19 June 2018

Available Online 6 August 2018

Keywords

predictive method

Rotary Equipment

modal

ABSTRACT

In this article we aim to study the modal behaviour of rotary equipment via predictive method with two examinations. Exam 1: identifying of a complete system without need to measuring of one row of FRF matrix while one column of this matrix is identified. The whole examination is simulated with rotor at four freedom degree. Exam 2: identifying the available parameters in an industrial system which was not considered in exam 1. The experimental system is a continuous vibration system, so in order to identify such a system, we need to use a method that describe it into a discrete system to illustrate the turbulences in data measuring. After that, we can explain the continuous system with a short model at a certain frequency band. Furthermore, we can estimate the modal parameters. It is also showed that the accuracy which special left vectors were determined can actually affected by the accuracy of modal constants related to the measured data. As a result, the special left vectors are affected by turbulences of the measured data. The effects of turbulences

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Hossein Pirzadeh, Alireza Mohammadion, Armen Adamian, Identifying the modal behaviour of rotary equipment via estimation method, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 2, pp. 46-54, 2018 (In Persian)

on freedom degrees with small response amplitude at bond frequency in the vicinity of closed modes, are more distinguished. Despite of the vibrations, the predicted special left vectors for determining one row of FRF matrix is suitable with one measured column.

۱- مقدمه

موارد مورد مطالعه در این مقاله شامل کاربرد روش پیش بینی^۱ در تخمین بردارهای ویژه چپ بجای اندازه گیری مستقیم، می-باشد.

در ابتدا یک مدل عددی مربوط به یک سیستم چهار درجه آزادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نقطه شروع کار برای توصیف یک روتور، یک سری شبیه سازی عددی با توجه به اندازه‌گیری‌های FRF است. به منظور ارزیابی عملکرد روش توصیفی تحت شرایط کنترل شده، فرض می‌شود که داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری فاقد هرگونه اغتشاش^۲ هستند. نشان داده خواهد شد که این روش در مورد داده‌های بدون اغتشاش کارآمدی لازم را دارد اما خطاهای کوچک در تحلیل مودال FRFهای اندازه‌گیری شده، دقت پیش بینی بردارهای ویژه چپ را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

در قدم بعدی از موتور یک توربین بادی برای انجام آزمایش استفاده گردید. شناسایی خصوصیات دینامیکی آن با استفاده از روش مطرح شده در آزمایش قبل انجام گرفت با این تفاوت که داده‌های مورد استفاده در این تحلیل هنگامی که موتور در آزمایشگاه در حال کارکردن بود، برداشت گردیدند. هدف از انجام این آزمایش ارزیابی روش مطرح شده در مواردی است که الف) سیستم مورد مطالعه پیوسته بوده و در نتیجه شامل بینهایت درجه آزادی باشد و ب) داده‌های پاسخ‌اندازه‌گیری شده تحت تاثیر اغتشاش باشند. اثر مدهای نزدیک بهم بر روی دقت روش و همچنین انتخاب بهینه‌ترین درجات آزادی برای اندازه‌گیری، از مواردی است که در سیستم دوم مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

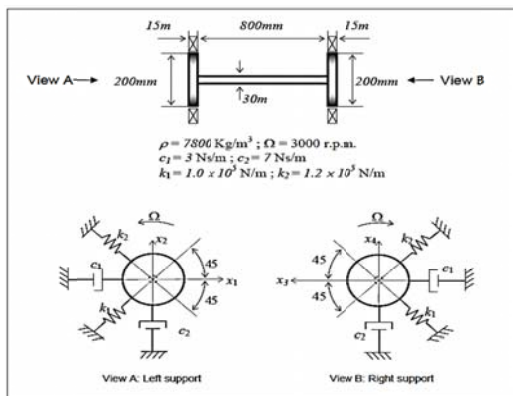
دقت شناسایی سیستم از طریق روش پیش بینی، بستگی به کیفیت داده‌های FRF اندازه‌گیری شده دارد. حضور اغتشاش در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده، اثر منفی بر خروجی تحلیل مودال خواهد داشت. این اثرات مخصوصاً در سیستم‌هایی که دو یا تعداد بیشتری مود نزدیک بهم دارند، خود را نشان می‌دهند. نشان داده خواهد شد که از بردارهای چپ پیش بینی شده برای تخمین دقیق پاسخ سیستم به نیروهای تحریک می‌توان

استفاده کرد. یکی از کاربردهای عملی این ویژگی آن است که این اجازه را به ما میدهد پاسخ‌های سیستم را، که در اثر اعمال نیروها به اجزاء دوار بوجود آمده‌اند، بدون نیاز به اندازه‌گیری، تخمین بزنیم.

۲- مدل عددی روتور صلب چهار درجه آزادی

روتور استفاده شده در این مورد در شکل ۱ نشان داده شده است. این روتور شامل یک شفت صلب است که دو دیسک صلب به دو انتهای آن متصل شده است. دیسک‌ها، همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، بر روی تکیه گاههای انعطاف پذیر و میرا قرار داده شده‌اند. چگالی روتور برابر با چگالی فولاد در نظر گرفته شده و سرعت دوران آن ۳۰۰۰ دور بر دقیقه در جهت ساعتگرد در نظر گرفته شده است.

تکیه گاه سمت چپ غیر ایزوتروپیک است اما سختی مقطع آن بر حسب سیستم مختصات متعامد که با X_1 و X_2 تعریف میشود، متقارن است. ماتریس سختی متناظر با این تکیه گاه به شرح زیر است.



شکل ۱ روتور صلب با ۴ درجه آزادی

$$[K_A] = \begin{bmatrix} 1.100 & 0.100 \\ 0.100 & 1.100 \end{bmatrix} \times 10^5 \frac{N}{M} \quad (1)$$

تکیه گاه سمت راست دارای سختی مقطع غیر متقارن است که مانند یک یاتاقان هیدرودینامیکی عمل میکند. ماتریس سختی آن بر حسب مختصات متعامد تعریف شده با X_3 و X_4 به قرار زیر است:

$$[K_B] = \begin{bmatrix} 1.100 & 0.124 \\ 0.076 & 1.100 \end{bmatrix} \times 10^5 \frac{N}{M} \quad (2)$$

¹ predictive method
² noise

$$q \geq \sqrt{n_c^2 + n_k^2} - N + 1 = 1.4721 \quad (7)$$

$$q \geq \max(n_c, n_k) - 2[N - \min(n_c, n_k)] = 0 \quad (8)$$

۲-۲- تحلیل مودال داده‌های FRF

از طریق تحلیل مودال داده‌های FRF اندازه‌گیری شده میتوان یک سری فرکانس‌های طبیعی، ضرائب میرایی و ثابت‌های مودال را شناسایی کرد. برای مطالعه این سیستم ابتدا در نرم افزار متلب شبیه سازی صورت گرفته و سپس داده‌های بدست آمده به کمک نرم افزار متلب مورد تحلیل قرار گرفتند. فرکانس‌های طبیعی و ضرائب میرایی با استفاده از روش حداقل مربعات شناسایی شدند که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در جدول ۲ ثابت‌های مودال تخمین زده شده برای سری کامل FRF‌های اندازه‌گیری شده نشان داده شده‌اند.

جدول ۱ فرکانسهای طبیعی و ضرائب میرایی هیستریک تخمینی

MODE, r	ω_r (Hz)	n_r
1	20.7650	0.0065
2	22.7429	0.0059
3	23.4181	0.0133
4	26.3260	0.0017

جدول ۲ ثابت‌های میرایی تخمینی برای یک مودل میرایی هیستریک

FRF	MODE1	MODE2	MODE3	MODE4
$-\omega^2\alpha_{11}$	0.0063- 0.1638i	0.0043- 0.1478i	-0.0079 - 0.1851i	-0.0005 - 0.1736i
$-\omega^2\alpha_{21}$	-0.0019 +0.1546i	0.0075- 0.0965i	0.0714 +0.1175i	-0.0792 - 0.1433i
$-\omega^2\alpha_{31}$	0.0044- 0.1725i	-0.0014 - 0.1102i	-0.0088 +0.1519i	0.0045 +0.1786i
$-\omega^2\alpha_{41}$	0.0000 +0.1448	0.0020- 0.1320	-0.0797 - 0.1514i	0.0798 +0.1357i
$-\omega^2\alpha_{12}$	-0.0460 - 0.0005i	0.0631 +0.0021i	-0.0689 - 0.0304i	0.0516 +0.320i

به منظور پیش بینی بردارهای ویژه چپ توجه به این نکته مهم است که ثابت‌های مودال تخمین زده شده متناظر با مدل یک سیستم با میرایی هیستریک بوده، درحالیکه روش پیش بینی استفاده شده برای یک سیستم با میرایی ویسکوز است. بنابراین لازم است که یک سری پارامترهای مودال که منطبق با سیستمی با میرایی ویسکوز هستند، قبل از آنکه تخمین زدن بردارهای ویژه چپ بر اساس این روش شروع شود، شناسایی شوند.

هنگام دوران روتور نیروهای ژيروسکوپی پدیدار میشوند. علت این امر ترکیب اثرات مومنتوم زاویه‌ای دیسک حول محور دوران از یک سو و انحراف زاویه‌ای این محور از سوی دیگر است. این اثرات سبب بوجود آمدن بخشی در ماتریس میرایی سیستم می‌شوند که به جزء متقارن-متضاد^۱ معروف است. درجات آزادی استفاده شده در این تحلیل، محورهای X_1 ، X_2 ، X_3 و X_4 هستند که حرکت روتور در امتداد آنها تعریف می‌شود. (شکل ۱) ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی متناظر با این درجات آزادی به ترتیب در زیر تعریف شده‌اند:

$$[M] = \begin{bmatrix} 5.161 & 0 & 0.720 & 0 \\ 0 & 5.161 & 0 & 0.720 \\ 0.720 & 0 & 5.161 & 0 \\ 0 & 0.720 & 0 & 5.161 \end{bmatrix} \text{Kg} \quad (3)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 3.000 & 17.620 & 0 & -17.620 \\ -17.620 & 7.000 & 17.62 & 0 \\ 0 & -17.620 & 3.00 & 17.620 \\ 17.620 & 0 & -17.62 & 7.000 \end{bmatrix} \frac{N}{M/S} \quad (4)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 1.100 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.100 & 1.100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.100 & 0.124 \\ 0 & 0 & 0.076 & 1.100 \end{bmatrix} \times 10^5 \frac{N}{M} \quad (5)$$

ابعاد سیستم $N=4$ است. از معادلات (۴) و (۵) می‌توان مشاهده کرد که تعداد درجات آزادی که درگیر بخش غیرمتقارن ماتریس‌های میرایی و سختی هستند، با خط چین نمایش داده شده‌اند، به ترتیب $n_c=4$ و $n_k=2$ است. مطابق با فرضیات مطرح شده در روش پیش بینی^۲ خصوصیات، ماتریس جرم متقارن است. [۴-۱]

در زیر روند تعیین بردارهای ویژه چپ سیستم با استفاده از اندازه‌گیری‌های شبیه سازی شده FRF توضیح داده می‌شود.

۲-۱- FRF‌های مورد نیاز

مطابق معادلات (۶) الی (۸)، شناسایی کامل سیستم نیازمند اندازه‌گیری یک ستون کامل از ماتریس FRF و حداقل دو درایه از یکی از سطرهای آن است. محقق شدن این الزام، شرایط برقراری هر سه نامساوی زیر را بطور همزمان فراهم میکند.

$$q \geq 1 \quad (6)$$

¹ skew-symmetric component

جدول ۳ بردارهای ویژه چپ تخمین زده شده با همتایان دقیقشان مقایسه شده‌اند. در ستون خطا، اختلاف بین مقادیر دقیق و تخمین زده شده هر بردار ویژه چپ به صورت درصدی از مقدار دقیق آن ارائه شده است.

جدول ۳ مقایسه درایه‌های بردارهای ویژه چپ

MODE	EXACT	ESTIMATED	ERROR %
1	0.0092- 0.0089i	0.0092- 0.0089i	0.0000
	-0.0096 +0.0098i	-0.0097 +0.0098i	0.7289
	0.0086- 0.0084i	0.0086- 0.0085i	0.8318
	-0.0100 +0.0103i	-0.0100 +0.104i	0.6966
2	0.0087- 0.0085i	0.0088- 0.0084i	1.1627
	0.0131- 0.0128i	0.0131- 0.0126i	1.0920
	0.0109- 0.0121i	0.0109- 0.0118i	1.8421
	0.0096- 0.0099i	0.0098- 0.0098i	1.6215
3	0.0094- 0.0098i	0.0094- 0.0099i	0.7364
	-0.0174 +0.0065i	-0.0175 +0.0064i	0.7614
	-0.0124 +0.0117i	-0.0124 +0.0115i	1.1731
	0.0145- 0.0041i	0.0147- 0.0043i	1.8770
4	0.0093- 0.0093i	0.0093- 0.0093i	0.0000
	0.0136- 0.0031i	0.0136- 0.0032i	0.7169
	-0.0087 +0.0092i	-0/0087 +0.0094i	1.5795
	-0.0139 +0.0036i	-0.0139 +0.0037i	0.6964

۲-۵- بحث و نتیجه گیری

در سیستم مورد مطالعه بردارهای ویژه چپ روتور نمایش داده شده در شکل ۱ از اندازه‌گیری‌های یک ستون ماتریس FRF به علاوه یک درایه اضافه از یک سطر مشخص گردید. برای این سیستم نشان داده شد که بدست آوردن کامل پارامترهای مودال یک ساختار ماشین دوار بدون نیاز به اندازه‌گیری کامل یک ردیف از ماتریس FRF آن و یک ستون آن امکان پذیر می‌باشد. علاوه بر این، از نتایج ارائه شده در جدول ۳ میتوان مشاهده کرد که پیش بینی بردارهای ویژه چپ می‌تواند با دقت ۹۸٪ انجام پذیرد که این بالاتر از چیزیست که در تحلیل داده اندازه‌گیری شده واقعی در دسترس می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان از روش پیش-بینی برای بدست آوردن تخمین‌های دقیقی از بردارهای ویژه

اگر ضرائب میرایی ویسکوز و هیستریک ثابت و برابر با مقدار آنها در رزونانس در نظر گرفته شوند، فرکانسهای طبیعی میرا، ω_r ، نسبت میرایی بحرانی، ζ_r ، مقادیر ویژه مختلط، λ_r ، متناظر با سیستمی با میرایی ویسکوز از طریق روابط زیر با فرکانسهای طبیعی، ω_r ، ضرائب میرایی، η_r ، یک سیستم با میرایی هیستریک مرتبط میشوند.

$$\omega_r = \omega_r \sqrt{1 - \frac{\eta_r^2}{4}} \quad (9)$$

$$\zeta_r = \frac{\eta_r}{2} \quad (10)$$

$$\lambda_r = -\zeta_r \omega_r + i \omega_r \quad (11)$$

۲-۳- نرمالسازی بردار ویژه

ثابت‌های مودال تخمین زده شده، برای استخراج بردارهای ویژه راست نرمال شده و دو درایه از بردار ویژه چپ نرمال شده استفاده میشوند. نرمال سازی این امکان را فراهم می‌آورد که برای یک درایه از بردارهای ویژه راست یا چپ مربوط به هر مود، یک مقدار اختیاری تعریف شود. با این حال برای هر FRF، توسط رابطه زیر، ثابت‌های مودال را میتوان با المان‌های متناظر از بردارهای ویژه راست و چپ نرمال شده مربوط کرد: $[\delta-4]$

$$rA_{ij} = (\varphi_R)_{ri} (\varphi_L)_{rj} \quad (12)$$

در این رابطه r بیانگر شماره مود و i و j بیانگر شماره سطر و ستون ماتریس FRF است که با FRF اندازه‌گیری شده مطابقت دارد.

در این سیستم فرض میشود که عناصر مربوط به FRF اندازه‌گیری شده، برای تمام مودها با یکدیگر برابر باشند:

$$(\varphi_R)_{r1} = (\varphi_L)_{r1} = \sqrt{rA_{11}} \quad (13)$$

همچنین سایر درایه‌های مربوط به بردارهای ویژه چپ را میتوان با استفاده از شاخص j و از طریق رابطه زیر بدست آورد.

$$(\varphi_L)_{rj} = \frac{rA_{1j}}{rA_{11}} \cdot (\varphi_L)_{r1} \quad (14)$$

۲-۴- نتایج

در مورد این سیستم و برای سادگی کار، بردارهای ویژه راست و چپ نرمال شده به اختصار بردارهای ویژه راست و چپ نامیده میشوند.

با مشخص شدن مقادیر ویژه، بردارهای ویژه و دو درایه از هر بردار ویژه چپ از داده FRF اندازه‌گیری شده، این امکان فراهم میشود که با معرفی سیستمی از معادلات استاندارد، سایر درایه‌های بردارهای ویژه چپ را محاسبه نمود.

به منظور ارزیابی دقت درایه‌های بدست آمده، مقادیر دقیق ثابت‌های مودال بطور مستقیم از ماتریس‌های خصوصیت فضایی که در معادلات (۳ الی ۵) بیان شده‌اند، محاسبه گردید. در

استفاده از روشی است که آنرا به مانند یک سیستم گسسته توصیف کند و ب) حضور اغتشاش در اندازه‌گیری‌ها.

تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش نمونه‌های واقعی هستند که در صنعت برای ارزیابی آثار دینامیکی ناشی از تقابل روتور- استاتور مورد استفاده قرار می‌گیرند. عضو انعطاف پذیر اصلی این سازه، شماره ۱ در شکل ۲، نقش ساختار پره را ایفا می‌کند، دارای خصوصیت‌های سختی به شدت ناهمسان‌گرد^۲ در مقطع می‌باشد. این عضو یک جرم بزرگ متصل به خود را نیز تحمل می‌کند. این جرم شامل یک محفظه ساکن است، شماره ۲ در شکل ۲، که شبیه به یک پوشش و محافظ برای روتور نصب شده در داخل آن عمل می‌کند. روتور شامل یک شفت فولادی بلند است که فقط در یک انتهای آن بر روی دو یاتاقان غلطکی نزدیک بهم قرار گرفته است و شبیه تیر یک سرگردار فرض می‌شود. به دیگر انتهای شفت یک تیغه جداساز فولادی سنگین نصب شده است. به علت تجهیزات نصب شده، چرخش تیغه جداساز، در ترکیب با ارتعاشات شفت، سبب خلق نیروهای ژيروسکوپی بزرگی میشود که وجود آنها در سرعت‌های دورانی پایین نیز مشهود است.

سیستم توسط یک موتور پله‌ای، شماره ۳ در شکل ۲، رانده می‌شود که این موتور توسط یک شفت فولادی توخالی، شماره ۴ در شکل ۲، به روتور متصل شده است. اتصال این شفت به موتور توسط کوپلینگ اولدهام^۳ و اتصال موتور به شفت اصلی توسط کوپلینگ بلوز^۴ صورت گرفته است. این ترکیب کوپلینگ‌ها سبب از بین رفتن ناهمراستایی‌های زاویه‌ای شده و ارتعاشات موتور را از ارتعاشات روتور اصلی جدا میکند. از یک کنترل کننده حالت جامد^۵ برای تنظیم سرعت چرخش استفاده شده است.

چپ استفاده نمود. با این حال، معیاری برای اثربخشی فاکتورهای تجربی، مانند وجود اغتشاش در داده‌های اندازه-گیری، در دقت پارامترهای مودال تخمین زده شده فراهم نگردید.

خطاهای بیان شده در جدول ۳ می‌توانند ناشی از سه عامل باشند. اولین مورد خطای گرد کردن کمیت‌های درگیر در محاسبات به ۴ رقم میباشد. اگر چه گرد کردن تا این میزان اثر قابل توجهی در بیشتر مراحل محاسبه ندارد، اما میتواند هنگام کار با مقادیر نسبتاً کوچک، ظاهر شود.

دومین منبع خطا مربوط میشود به روند شناسایی مقادیر ویژه و ثابت‌های مودال از داده FRF اندازه‌گیری شده. دقت شناسایی این پارامترها به انتخابهای متعددی بستگی دارد که در طی روند تحلیل مودال آنها اتخاذ میشود مانند انتخاب الگوریتم برازش منحنی^۱ و نیز انتخاب نقاطی که قرار است روی آنها برازش صورت گیرد. انتخاب‌های صورت گرفته به مهارت فرد بستگی دارد و این فاکتور انسانی میتواند سبب بوجود آمدن خطا در تخمین‌های صورت گرفته باشد.

سومین منبع خطا که میتواند مهمترین نیز باشد شناسایی بر اساس الگوریتمی است که برای سیستم‌های با میرایی ویسکوز مناسب بوده اما در اینجا برای سیستمی که میرایی آن هیستریک فرض شده، استفاده شده است. اگرچه در فضاهای فرکانسی محدود مانند ناحیه‌های رزونانس، رفتار یک سیستم با میرایی ویسکوز را بتوان با رفتار سیستمی با میرایی هیستریک مدل نمود، اما اختلافات موجود بین مدل واقعی و فرض شده به طور کامل قابل چشم‌پوشی نیست.

جدا از خطاهای عددی، فاکتورهایی عملی مانند وجود اغتشاش، انتخاب درجات آزادی برای تحریک سازه و انتخاب درجات آزادی برای اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه به تحریکات اعمال شده نیز میتوانند در دقت پارامترهای مودال تاثیر گذار باشند.

۳- آزمایش دوم: تجهیزات توربین بادی

هدف این آزمایش ارزیابی عملکرد روش شناسایی بر اساس پیش بینی بر روی یک سازه واقعی، نشان داده شده در شکل ۲ است. انجام این آزمایش مستلزم در نظر گرفتن دو پارامتر است که در آزمایش اول ظاهر نمی‌شود. الف) سیستم مورد آزمایش یک سیستم ارتعاشی پیوسته بود بنابراین شناسایی آن نیازمند

² anisotropic transverse stiffness characteristics

³ Oldham coupling

⁴ bellows coupling

⁵ solid-state controller

¹ curve-fitting algorithm

ژيروسکوپ^۲ هستند. با توجه به این فرضیات تنها ماتریس میرایی است که درجه قابل توجهی از عدم تقارن را به نمایش می‌گذارد.

از پیامدهای مستقیم این فرضیات میتوان به دو مورد زیر اشاره کرد:

۱. قله FRFها نباید با تغییر جهت دوران روتور، تحت تاثیر قرار بگیرد

۲. اثر تغییر جهت چرخش باید با تعویض کردن محل اعمال تحریک و اندازه‌گیری پاسخ، برعکس شود.

۳-۳-۳ محدودده شناسایی سیستم

روش شناسایی پیش‌بینی بر این فرض استوار است که رفتار دینامیکی یک سازه را می‌توان با استفاده از تعداد محدودی از مودها بیان کرد. از آنجاییکه سیستم مورد بررسی در این آزمایش یک سیستم پیوسته است، و در نتیجه بینهایت مود دارد، پس باید بازه فرکانسی محدودی را انتخاب نمود تا با فرضیات روش پیش‌بینی تضادی نداشته باشد.

برای تعیین این بازه، FRFهای متناظر با سه محل تحریک مختلف اندازه‌گیری شد. با این کار هنگام تعیین بازه فرکانسی محدود این احتمال که مودی وجود داشته باشد که در این بازه قرار بگیرد اما تحریک نشده باشد خیلی کم می‌شود.

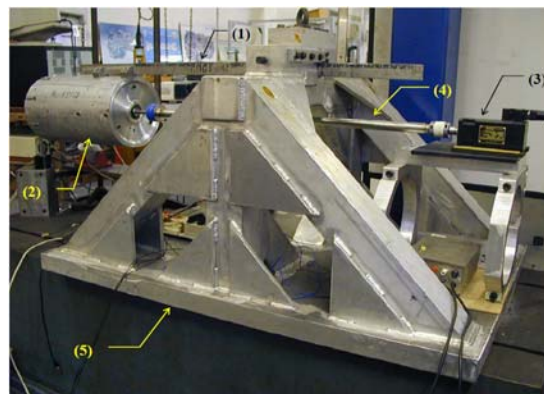
۴-۳-۴ نتایج

بردارهای ویژه چپ، $[\Phi_L]$ ، برای سازه مورد آزمایش با جهت دوران پادساعتگرد محاسبه گردیدند. ممکن است که این بردارها با بردارهای ویژه راست، $[\Phi_R]$ ، سازه با جهت دوران ساعتگرد مقایسه شوند. انتظار می‌رود هر دوی این بردارهای ویژه، با یکدیگر برابر باشند. این بردارها، بر حسب مختصات قطبی، در جدول ۴ ارائه شده است. ستون خطا بیان‌کننده مقدار اختلاف بین درایه‌های بردارهای ویژه که از محاسبات و اندازه‌گیری‌ها بدست آمده‌اند، به صورت درصدی از مقدار اندازه‌گیری، می‌باشند.

۴-۳-۴-۱ خطا در پیش‌بینی بردارهای ویژه چپ

مقدار خطای بوجود آمده در پیش‌بینی بردارهای ویژه چپ، در مورد این سازه تحت آزمایش، بطور قابل توجهی از مقادیر عددی بدست آمده بزرگتر بودند. این اختلاف در ستون خطای جدول ۳ و ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

در سازه تحت آزمایش وجود نویز مخصوصاً در یاتاقان‌های تکیه‌گاهی برای روتور اصلی، قابل پیش‌بینی بود. وجود نویز



شکل ۲ تجهیزات آزمایش توربین بادی

به منظور دستیابی به هدف‌های از پیش تعیین شده این آزمایش، از دو روش مختلف، یکی بر اساس روش پیش‌بینی و دیگری بر اساس روش شناسایی مستقیم بردارهای ویژه چپ از داده‌های اندازه‌گیری شده، اقدام به شناسایی خصوصیات تجهیزات آزمایش شده است.

۳-۱-۱ بررسی روش پیش‌بینی

در این روش، FRFهای مرتبط با یک ستون از ماتریس FRF، اندازه‌گیری می‌شوند. در صورت لزوم، تعدادی درایه از یکی از سطرها یا ستون‌ها نیز اندازه‌گیری می‌شوند. مجموعه‌ای از بردارهای ویژه راست و مقادیر ویژه سیستم از طریق تحلیل مودال FRFهای اندازه‌گیری شده حاصل می‌شوند. از پارامترهای مودال بدست آمده برای محاسبه بردارهای ویژه چپ استفاده می‌شود. [۶]

۳-۲-۲ شناسایی مستقیم بردارهای ویژه چپ از اندازه‌گیری

حداقل دو روش برای شناسایی مستقیم پارامترهای مودال تجهیزات از اندازه‌گیری وجود دارد. اولین روش براساس روند توصیف شده توسط نوردمن^۱ می‌باشد. [۶] که شامل اندازه‌گیری یک سطر و یک ستون از ماتریس FRF، هنگام دوران روتور، میباشد. این رویکرد شامل برخی محدودیت‌های عملی میباشد مخصوصاً هنگامیکه به شفت در حال دوران می‌بایست تحریک اعمال شود. به منظور غلبه بر این مشکل از روش اندازه‌گیری جایگزین با در نظر گرفتن فرضیات زیر استفاده شده است. الف) به علت عدم حضور فیلم روغن و میرایی داخلی کم شفت، بعید است که نیروهای دایره‌ای چنان افزایش یابند که سبب از بین رفتن تقارن ماتریس سختی تجهیزات شوند. ب) به علت اینرسی دورانی زیاد شفت و تیغه جداساز، نیروهای دورانی که رفتار تجهیزات را تحت تاثیر قرار میدهند غالباً از نوع

² the sense of the gyroscopic moments

¹ Nordman

محل از درجات آزادی آن نیست. این خصوصیت پیش بینی مخصوصاً زمانی مفید است که شناسایی رفتار سیستم در برابر نیروهایی که به اجزاء دوار آن اعمال میشود، مد نظر باشد. بدون در نظر گرفتن این جایگزین، لازم است که محرک مستقیماً به یک جزء دوار متصل شود که این امر در عمل با پیچیدگی‌های بسیاری توأم است. [۷].

در آزمایش دوم، FRFهای متناظر با اعمال یک تحریک به درجه آزادی ۲۵ ام، در تمام ۲۶ درجه آزادی سیستم، اندازه‌گیری شد. تحلیل مودال این داده‌ها منجر به شناسایی شش مقدار ویژه و یک دسته بردار ویژه راست شد که هر کدام از ۶ جزء تشکیل شده هستند. سپس از این پارامترهای مودال برای محاسبه بردارهای ویژه چپ متناظر با همان مودها و درجات آزادی استفاده گردید.

در اندازه‌گیری‌ها، دقت ثابت‌های مودال که از FRFهای اندازه‌گیری شده تخمین زده می‌شود، را تحت تاثیر قرار می‌دهد. وجود خطا در تخمین این پارامترها سبب ایجاد خطا در تخمین بردارهای ویژه راست و مقادیر میرایی شده که این خطاها به نوبه خود خطا در مقادیر پیش بینی بردارهای ویژه چپ را بوجود می‌آورند.

اثر اغتشاش بر پارامترهای یک مود، بستگی به دامنه ارتعاش آن مود خاص برای درجه آزادی مشخص شده در سوال، دارد. هرچقدر که دامنه کمتر باشد، این اثرات بیشتر شده. این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که جزء بردار ویژه راست مربوط به آن درجه آزادی، مقدار کوچکی داشته باشد یا مود به خوبی تحریک نشده باشد.

همچنین وجود اغتشاش در اندازه‌گیری باعث زیاد شدن خطا در برخی از نتایج آزمایش شده، این مقادیر بصورت پررنگ در جدول ۴ مشخص شده است.

خطای مربوط به مود ششم برای تمام درجات آزادی بزرگ است. باید در نظر داشت که ممکن است نیروی تحریک اعمال شده در درجه آزادی ۲۵ام نتوانسته باشد این مود را به خوبی سایر مودها تحریک کرده باشد. این امر با مشاهده مقادیر کوچک المان‌های متناظر با این مود در ستون "اندازه‌گیری شده" جدول ۴ و همچنین از دامنه‌های کوچک قله‌های متناظر با این مود در تمام FRFها مشخص می‌باشد.

با مشاهده جدول ۴ می‌توان پی برد که علیرغم تحریک مناسب مود چهارم، خطاهای متناظر با آن برای تمام درجات آزادی بزرگ است و علت آنرا نمی‌توان مربوط به کوچک بودن دامنه ارتعاش آن دانست. با توجه به این مود، خطاهای بوجود آمده در شناسایی ثابت‌های مودال آنرا می‌توان مربوط به مود دیگری دانست که نزدیک به آن و در همسایگی فرکانس ۲۱٫۵ هرتز قرار دارد.

۳-۴-۲ پیش بینی FRFهای متناظر با ستون‌های

اندازه‌گیری نشده ماتریس FRF

با وجود آنکه مقادیر پیش بینی شده برای برخی درایه‌های بردارهای ویژه غیر دقیق بود اما همان تخمین‌های غیر دقیق هم این امکان را فراهم می‌کنند که بتوان FRFهای متناظر با نقاط مختلف نیروی تحریک را تنها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده با یک محل تحریک، پیش بینی نمود. این امر زمانی ارزش خود را نشان میدهد که بدانیم برای شناسایی رفتار سیستم در برابر نیروهای اعمالی، نیازی به تحریک چندین

جدول ۴ مقایسه بین بردارهای ویژه چپ

MODE r	DOF	COMPUTED { θ_L }, CCW		MEASURED { θ_R }, CW		ERROR %
		MAG	ANGLE	MAG	ANGLE	
1	6	0.0019	133.96	0.0027	136.82	28.51
	13	0.0183	135.07	0.0173	134.60	5.65
	23	0.0539	135.23	0.0510	129.43	11.82
	24	0.0050	99.61	0.0027	68.90	109.08
	25	0.0249	-45.02	0.0239	-43.15	5.36
	26	0.0264	135.16	0.0216	137.04	22.36
2	6	0.0164	141.35	0.0163	137.76	6.34
	13	0.0018	16.62	0.0020	31.82	7.18
	23	0.0062	-35.52	0.0033	-60.88	104.59
	24	0.0483	140.79	0.0510	139.96	5.53
	25	0.0131	-45.68	0.0134	-44.93	2.52
	26	0.0148	-31.28	0.0146	-31.14	1.37
3	6	0.0088	85.74	0.0079	92.82	17.12
	13	0.0116	174.21	0.0106	-179.42	14.99
	23	0.0304	-1.27	0.0285	-2.24	6.75
	24	0.0064	-46.28	0.0070	-92.48	75.31
	25	0.0119	-44.49	0.0119	-46.23	3.07
	26	0.0128	-151.63	0.0118	-147.82	11.15
4	6	0.0107	136.80	0.0137	137.81	21.73
	13	0.0013	121.89	0.0053	46.28	96.87
	23	0.0110	-84.07	0.0129	-133.17	78.08
	24	0.0150	32.25	0.221	-34.50	96.18
	25	0.0096	-49.31	0.0128	-33.91	34.14
	26	0.0092	-47.84	0.120	-23.32	43.85
5	6	0.0117	161.05	NOT DETECCTED		-----
	13	0.0072	50.96			
	23	0.0125	-146.91			
	24	0.0315	-84.98			
	25	0.0086	-36.67			
	26	0.0148	11.27			
6	6	0.0011	-110.47	0.0012	154.74	146.42
	13	0.0091	-24.96	0.0097	-55.25	50.90
	23	0.0056	-26.80	0.0057	-59.15	55.36
	24	0.0025	-8.95	0.0004	58.25	533.90
	25	0.0049	-44.52	0.0047	-40.09	8.62
	26	0.0071	119.12	0.0056	117.18	28.09

۴- نتیجه گیری

الف) در این مقاله مشخص گردید که می توان یک ماشین دوار را به صورت ترکیبی از اجزاء دوار و غیر دوار مدل کرد. با استفاده از این روش مدل سازی می توان درجات آزادی را که در آنها نیروها می توانند در پادمقارن کردن ماتریس های سختی و میرایی مشارکت داشته باشند، شناسایی نمود. با این اطلاعات می توان بخش های غیر مقارن این ماتریس ها را تعیین کرد. این بخش های غیر مقارن شامل ورودی هایی از آن دسته درجات آزادی میباشند که یا برای اجزاء دوار تعریف شده اند و یا در ارتباط مستقیم با اجزاء دوار قرار دارند.

این روش مدل سازی سبب آسان نمودن مطالعه ساختار ماشین های دوار می شود زیرا استفاده از بخش های مقارن ماتریس های سختی و میرایی را، به منظور ساده سازی ارتباطات موجود بین پارامترهای مودال و فضایی این سیستم ها، مقدور می سازد.

ب) استخراج ارتباطات دقیق بین پارامترهای مودال و فضایی ساختار ماشین های دوار نیازمند حذف فاکتور مقیاس اختیاری است که در بیان بردارهای ویژه چپ و راست استفاده می گردد. این کار را می توان با نرمال سازی بردارهای ویژه انجام داد.

ج) محاسبه بردارهای ویژه چپ ماشین های دوار را میتوان بر اصول زیر بنا نهاد:

۱. ارتباطات موجود بین پارامترهای فضایی و مودال.
۲. اطلاع از درجات آزادی که مربوط به بخش مقارن ماتریس های سختی و میرایی می شوند.

۳. اندازه گیری ستون کاملی از ماتریس FRF به همراه تعدادی از درایه های یکی از سطرهای آن.

ترکیب موارد ۱ و ۲ این امکان را ایجاد می کند که ارتباطات بین پارامترهای مودال ماشین های دوار را ایجاد کنیم. محاسبه بردارهای ویژه چپ می توان بر اساس تکمیل اندازه گیری های FRF با این ارتباطات صورت گیرد. به همین خاطر تعداد اندازه گیری های FRF که برای شناسایی این پارامترها مورد نیاز است می تواند حداقل گردد.

د) شناسایی کامل مودال یک سیستم دوار بدون نیاز به اندازه گیری یک ردیف کامل از ماتریس های FRF صورت می گیرد. تعداد المان های یک ماتریس FRF که باید اندازه گیری شوند بستگی به تعداد درجات آزادی سیستم و تعداد درجات آزادی مربوط به بخش های نامقارن ماتریس های سختی و میرایی دارد. تعداد درایه هایی از بردار ویژه چپ که می بایست

مستقیماً از داده های اندازه گیری شده محاسبه شوند، بستگی به مرتبه زیر ماتریسی دارد که از قسمت های غیر مقارن ماتریس های خصوصیت فضایی تشکیل می گردد.

ه) برای استفاده از روش شناسایی خصوصیتی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت می بایست پاسخ دینامیکی ماشین دوار را در یک ناحیه محدود، مورد بررسی قرار داد.

و) وجود اغتشاش بر روی درجات آزادی که دامنه های پاسخ کوچکی دارند یا بر روی مودهایی که بسیار به یکدیگر نزدیک هستند، اثر بیشتری دارد.

ز) روش شناسایی خصوصیت مودال استفاده شده در این مقاله باعث کاهش تعداد اندازه گیری هایی می شود که برای شناسایی پارامترهای مودال یک ماشین دوار مورد نیاز است.

۵- مراجع

- [1] Meirovitch, L., "A new method for the solution of the eigenvalue problem for gyroscopic systems", AIAA Journal, vol. 12, no. 10, pp. 1337-1342, October 1974.
- [2] Bucher, I. and Braun, S.G., "Left eigenvectors: extraction from measurements and physical interpretation", ASME Journal of Applied Mechanics, vol. 64, no. 1, March 1997, pp. 97-105.
- [3] Atkinson, K.E., An introduction to numerical analysis, Section 9.7 - Least squares solution to linear systems, John Wiley and Sons, Inc., Singapore 1988.
- [4] Barnett, S., Matrix methods for engineers and scientists, McGraw-Hill, London 1979.
- [5] Nordmann, R, Dynamics of Rotors, Stability and System Identification, Chapter 4.3: Identification of Modal Parameters of Rotors, Springer Verlag, pp. 371-393, 1984.
- [6] Nordmann, R., "Identification of the modal parameters of an elastic rotor with oil film bearings", Transactions of the ASME Journal of Vibration, Acoustics and Reliability in Design, v 106, n 1, pp 107-112, January 1984.
- [7] Kammer, D.C., "Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures", Journal of Guidance, Control and Dynamics, v 2, n 15, March-April 1991, pp 251-259.